

УДК 533.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КРУПНОМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ИОНОСФЕРЫ, ВЫЗВАННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА НЕЁ МОЩНОГО КОРОТКОВОЛНОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ, С ПОМОЩЬЮ СИГНАЛОВ GPS

А. В. Рябов^{1,2}, С. М. Грач^{1,2}, А. В. Шиндин^{1,2}, Д. С. Котик¹

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт;

² Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

В работе представлены результаты экспериментальных исследований искусственных крупномасштабных неоднородностей электронной концентрации в ионосфере с помощью двухчастотного радиопросвечивания возмущённой области сигналами GPS. При проходе спутников над областью воздействия анализировалось полное электронное содержание на траектории распространения сигнала GPS. С помощью вейвлет-анализа определён спектральный состав наблюдаемых вариаций. Оценены характерные масштабы искусственных неоднородностей электронной концентрации в F -слое. Установлено, что время существования неоднородностей после выключения воздействия достигает $15 \div 20$ мин. Подтверждены более уверенное возбуждение и большая интенсивность неоднородностей при наклоне диаграммы направленности станда к югу в направлении магнитного зенита.

ВВЕДЕНИЕ

При воздействии на ионосферу мощным коротковолновым радиоизлучением в области её отражения образуются неоднородности электронной концентрации с размерами от десятков сантиметров до десятков километров [1]. Диагностика крупномасштабной (более 0,5 км) структуры возмущённой мощной радиоволновой области ионосферы осуществляется с помощью просвечивания ионосферы декаметровым радиоизлучением космических радиостанций, с помощью ракурсного рассеяния радиоволн КВ и УКВ диапазонов, просвечивания возмущённой области УКВ сигналами низкоорбитальных спутников и геостационарных спутников, с помощью спутниковой радиотомографии, измерений электронной плотности *in situ* при пролёте космических аппаратов и геофизических ракет через возмущённую область и над ней (см. [1, 2] и цитированную там литературу).

Крупномасштабные неоднородности с масштабами $5 \div 50$ км могут также эффективно изучаться с помощью двухчастотного радиопросвечивания сигналами спутников систем «Navstar» (GPS) или ГЛОНАСС микроволнового диапазона. При распространении через возмущённую область у таких сигналов появляется дополнительный набег фазы, обусловленный дисперсией радиоволн в ионосферной плазме и линейно связанный с полным электронным содержанием (ПЭС) на траектории распространения [3, 4]. С начала 80-х годов данный метод используется для определения ПЭС в ионосфере в естественных условиях, а с 2007 года началось активное использование спутников системы «Navstar» для определения полного электронного содержания в ионосфере во время экспериментов по воздействию на ионосферу мощным коротковолновым радиоизлучением. Такие исследования проводились на стендах HAARP [5] и «Сура» [2, 6]. В экспериментах [2] и [5], проводившихся в дневное время, отмечалось коррелированное с воздействием увеличение ПЭС. В работе [6], где наблюдения проводились в основном после захода солнца при наклоне диаграммы направленности станда «Сура» на 12° к югу в плоскости геомагнитного меридиана, регистрировалось как заметное уменьшение ПЭС в возмущённой области, определяемой угловыми размерами диаграммы направленности станда, так и длиннопериодные ($10 \div 15$ мин) вариации

ПЭС относительно среднего значения. На основании полученных результатов авторами [6] сделано утверждение о проявлении эффекта магнитного зенита — наиболее эффективном воздействии на ионосферу в направлении вдоль геомагнитного поля.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований пространственно-временных характеристик искусственных возмущений концентрации плазмы, полученных в 2009–2010 годах с помощью просвечивания ионосферы сигналами GPS при пролёте спутников системы «Navstar» над станцией «Сура», расположенной вблизи посёлка Васильсурск Нижегородской области ($56,15^\circ$ с. ш., $46,1^\circ$ в. д.). Эксперименты проводились в различное время суток, однако наиболее результативными оказались измерения, проведённые в вечерние и ночные часы. В процессе экспериментов диаграмма направленности ориентировалась как вертикально вверх, так и под углом 12° к югу (локальные магнитные силовые линии наклонены к югу от вертикали на $18,5^\circ$), что позволило сопоставить эффективность воздействия на ионосферу в этих случаях. Ниже, в разделе 1, обсуждаются условия проведения экспериментов, в разделе 2 изложены методика и результаты анализа полученных данных, в разделе 3 полученные результаты обсуждаются и сравниваются с результатами, полученными другими исследователями.

1. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В течение 2009–2010 годов было проведено 3 серии измерений полного электронного содержания ионосферы: 26–28 августа 2009, 11–15 марта 2010 и 11–29 мая 2010 года, в общей сложности — 30 сеансов. В утреннее и дневное время (до 14:00 по местному времени) вариации ПЭС были отмечены лишь в одном сеансе из 10 проведённых, в то время как в более поздние часы вариации ПЭС отмечались более чем в половине сеансов.

Характер наблюдаемых искусственных вариаций ПЭС в наших экспериментах не зависел от времени суток. Поскольку результативных сеансов регистрации в утреннее и дневное время недостаточно для выявления каких-либо закономерностей, связанных с наблюдением в определённое время суток, то в работе основное внимание уделено вечерним и ночным наблюдениям.

Для воздействия на ионосферу во всех сеансах использовалась волна обыкновенной поляризации на частотах $f_0 = 4,300$ МГц и $f_0 = 4,785$ МГц, частота воздействия выбиралась исходя из условия $f_0 < f_{0F2}$, критическая частота f_{0F2} ионосферы варьировалась во время проведения экспериментов в пределах от 4,4 до 6,0 МГц. Эффективная излучаемая мощность на выбранных частотах составляла $65 \div 150$ МВт в зависимости от количества задействованных в работе передатчиков станция, антенных секций и рабочей частоты. Регистрация сигналов GPS, прошедших через возмущённую область, осуществлялась с помощью аппаратно-программного комплекса на базе специализированного приёмника «Prego-T», расположенного в непосредственной близости (около 500 м) от передающей антенны станции «Сура». В экспериментах использовались, в основном, режимы воздействия 2 мин — непрерывное излучение, 4 мин — пауза ([+2 мин, -4 мин]) и [+3 мин, -3 мин]. Кроме этого, в эксперименте 27 августа 2009 года в течение 23 мин осуществлялось непрерывное воздействие на ионосферу, а в 18:05 UTC (во время пролёта спутника G21 через кульминационную точку траектории над станцией «Сура») был изменён режим с непрерывного на режим [+2 мин, -4 мин]. К сожалению, во время этого эксперимента по техническим причинам использовались два из трёх передатчиков станции, и эффективная излучаемая мощность составила 65 МВт.

2. ОБРАБОТКА ДАННЫХ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исходные данные, содержащие измерения фазы L и псевдодальности P для рабочих частот $f_1 = 1\,575,42$ МГц и $f_2 = 1\,227,60$ МГц, представляют собой файлы в формате RINEX. Указанный формат предусматривает сохранение регистрируемых данных с каждого спутника в виде блоков определённой длины, каждый блок состоит из точного мирового времени, набега фазы относительно опорного сигнала приёмника и псевдодальности для каждой из рабочих частот. Набег фазы L на пути следования сигнала l связан с показателем преломления волны n выражением

$$L_i = \frac{2\pi f_i}{c} \int_l n_i dz, \quad (1)$$

где c — скорость света в вакууме, $i = 1, 2$. Частоты принимаемых сигналов f_1 и f_2 существенно превышают электронные плазменную и циклотронную частоты в ионосфере $f_i \gg \{f_p, f_c\}$ ($i = 1, 2$). Кроме того, в ионосфере, как правило, $f_p \gg f_c$. Поэтому для показателя преломления воспользуемся следующим простым выражением $n_i^2 = 1 - f_p^2/f_i^2$. Подставляя в это выражение формулу для плазменной частоты ($f_p^2 = N_e^2/(\pi m_e)$, N_e — концентрация электронов, m_e и e — масса и заряд электрона соответственно) и учитывая, что показатель преломления при малом отношении f_p/f_i слабо отличается от единицы, получаем связь ПЭС с набегом фазы:

$$\lambda_i L_i = 2\pi \int_l dz - \frac{e^2 I}{f_i^2 m_e}, \quad (2)$$

где $I = \int_l N_e dz$ — полное электронное содержание на пути следования сигнала, $\lambda_i = c/f_i$, $i = 1, 2$, — вакуумные длины волн, соответствующие частотам f_1 и f_2 . Разность произведений $\lambda_i L_i$ для первой и второй волн даёт формулу для ПЭС:

$$I_L = -\frac{1}{K} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + \text{const}, \quad (3)$$

где $K = 40,308 \cdot 10^{16} m_e^{-2} / \text{TECU}$, TECU — общепринятая единица измерения ПЭС, $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$, I_L — ПЭС, рассчитанное по измерениям фазы GPS сигнала, const — константа неопределённости, связанная с тем, что фаза принимаемого сигнала измеряется относительно опорного сигнала, генерируемого приёмником, который никак не синхронизован с оборудованием на спутнике. Аппаратные средства приёмника «Prego-T» позволяют измерять также псевдодальность $P = c \Delta t + c\tau$, где Δt — время распространения сигнала через ионосферу, τ — отклонение часов приёмника от системного времени GPS [3], $P_i = L_i \lambda_i + c\tau$, $i = 1, 2$. Отсюда следует, что ПЭС может быть также определено через разность псевдодальностей на частотах f_1 и f_2 :

$$I_P = -\frac{1}{K} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (P_2 - P_1). \quad (4)$$

Приёмник определяет фазу сигнала и псевдодальность независимо для каждой частоты. В силу конструктивных особенностей приёмника и его собственных алгоритмов обработки, фазовые измерения существенно более точны по сравнению с измерениями псевдодальности. Поэтому полное электронное содержание на пути следования сигнала будем определять с помощью выражения (3), а формулу (4) будем использовать для нахождения константы неопределённости

$$\text{const} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_{P_i} - I_{L_i}). \quad (5)$$

Здесь суммирование проводится по всей реализации, N — общее число отсчётов.

Проанализируем данные определения ПЭС во время нескольких пролётов спутников системы «Navstar» над стендом «Сура» во время его работы. Во всех экспериментах воздействие проводилось волной обыкновенной поляризации.

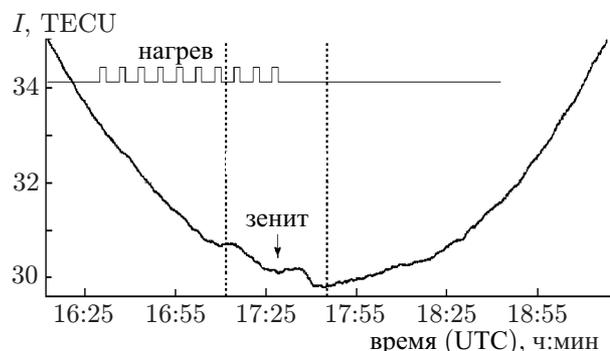


Рис. 1. Значение ПЭС, полученное 15.03.2010 по данным GPS-приёмника «Prego-T» со спутника G8. Пунктиром ограничен интервал пролёта спутника через диаграмму передающей антенны стенда «Сура» (режим излучения [+2 мин, -4 мин], $f_0 = 4,3$ МГц, $P_0 = 120$ МВт). Стрелка с надписью «зенит» указывает момент, когда спутник находился вертикально над стендом

15 марта 2010 года спутник G8 проходил над стендом «Сура» в вечерние часы. Во время пролёта с 16:30 до 17:30 UTC (19:30–20:30 LT) проводился нагрев ионосферы на частоте $f_0 = 4,3$ МГц с эффективной мощностью излучения $P_0 = 120$ МВт, диаграмма передающей антенны была направлена вертикально вверх. На рис. 1 показана временная зависимость ПЭС во время пролёта спутника над возмущённой областью, а также режим излучения мощной волны [+2 мин, -4 мин]. Прекращение воздействия в 17:27 UTC во время пролёта спутника над стендом было связано с уменьшением критической частоты f_{0F2} ниже рабочей частоты f_0 . Из рис. 1 видно, что во время пролёта спутника над возмущённой областью ионосферы появляются вариации ПЭС, что говорит о наличии крупномасштабных неоднородностей в этой зоне.

Колебания ПЭС наблюдаются даже после прекращения нагрева ионосферы. Из этого можно заключить, что время релаксации крупномасштабных искусственных неоднородностей составля-

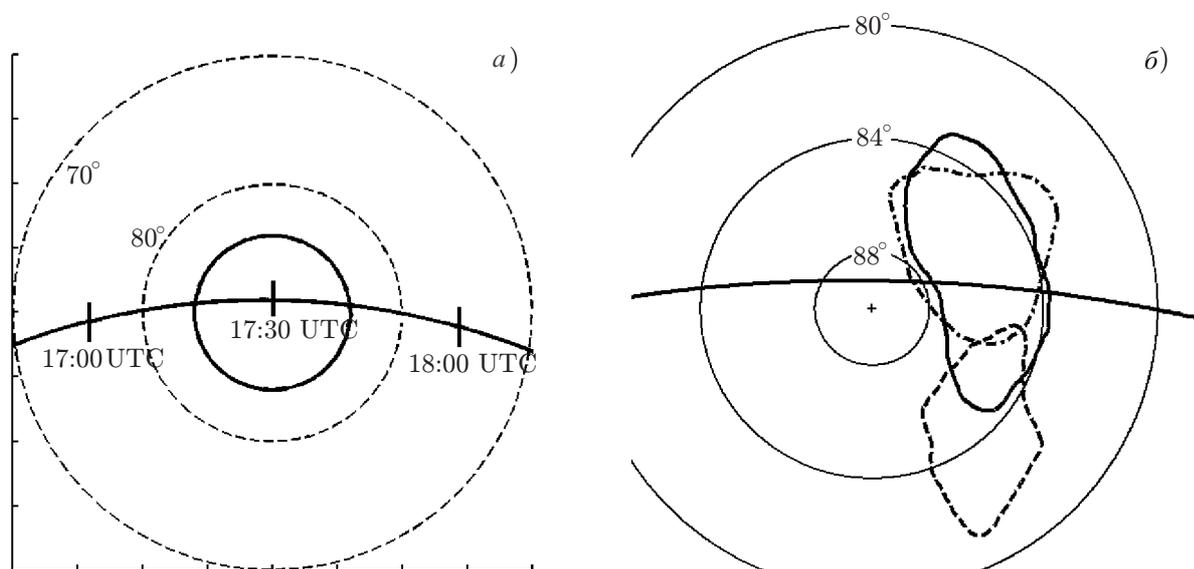


Рис. 2. Панель а: траектория спутника G8 15.03.2010 в топоцентрической системе координат (азимут, наклонение). Пунктиром отмечена сетка наклонений. Окружность в центре — диаграмма передающей антенны стенда «Сура». Короткими отрезками обозначено положение спутника в указанные моменты времени. Панель б: то же в более крупном масштабе; контурами показаны положения пятна искусственного оптического свечения ионосферы на длине волны 630 нм по уровню 50 % от максимального в 17:02 UTC (сплошная линия), 17:08 UTC (пунктир) и 17:15 UTC (штрихпунктир)

ет как минимум 15 мин. Оценить верхний предел времени релаксации исходя из результатов этого эксперимента не представляется возможным, поскольку спутник ушёл за пределы интересующей нас области до возвращения ионосферы в равновесное состояние. Время пролёта спутника через диаграмму передающей антенны стенда «Сура» составляет около 40 мин. На рис. 2 показана траектория спутника GPS, диаграмма передающей антенны в топоцентрической системе координат и контуры пятна искусственного оптического свечения ионосферы (обсуждается в заключении). В зените расстояние до спутника минимально, и, следовательно, значение ПЭС как интеграл по расстоянию от спутника до приёмника тоже минимально.

Для детального изучения малых вариаций ПЭС из исходной зависимости $I(t)$ удалялся тренд при помощи вычитания скользящего среднего с использованием линейной весовой функции:

$$dI[j] = I[j] - \frac{1}{N} \sum_{n=j-N}^{j+N} \left(I[n] \frac{N - |n - j|}{N} \right), \quad (6)$$

где dI — колебания ПЭС относительно среднего уровня, N — параметр усреднения, общее число точек суммирования. Поскольку регистрация данных велась с частотой оцифровки 1 Гц, то N численно равно времени усреднения в секундах. При обработке экспериментальных данных параметр усреднения составлял $15 \div 20$ мин. На рис. 3 показан временной ход ПЭС после удаления тренда при пересечении спутником возмущённой области. Как можно заметить, амплитуда колебаний достигает величины 0,15 TECU во время пролёта спутника через диаграмму антенны, угловые размеры которой составляют 12° по половинному уровню от максимума, период самых крупных осцилляций составляет порядка $15 \div 20$ мин.

Подобные вариации ПЭС, как правило, отсутствуют в невозмущённых условиях, поэтому крупные вариации ПЭС во время пролёта спутника через диаграмму передающей антенны обусловлены работой стенда «Сура».

Для оценки характерных поперечных масштабов неоднородностей проводилась вейвлет-обработка сигнала. На основе коэффициентов разложения C_{ab} строились периодограммы, отражающие эволюцию частотных составляющих исходного сигнала во времени:

$$C_{ab} = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} I(t) \Psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (7)$$

где a — параметр масштабирования (период T на рис. 4), b — текущий момент времени, Ψ — родительская функция вейвлет-преобразования, в нашем случае $\Psi(x) = \exp(-x^2/2) \cos(5x)$ (вейвлет Морле). Величина коэффициента C_{ab} по сути есть амплитуда колебаний с периодом a в момент времени b . Интегрирование по времени от $-\infty$ до $+\infty$ означает интегрирование по всей реализации ПЭС. Отметим, что в данном случае вид родительской функции не играет существенной роли, при использовании других функций результат менялся несущественно. На рис. 4 показана периодограмма сигнала, осциллограмма которого приведена на рис. 3.

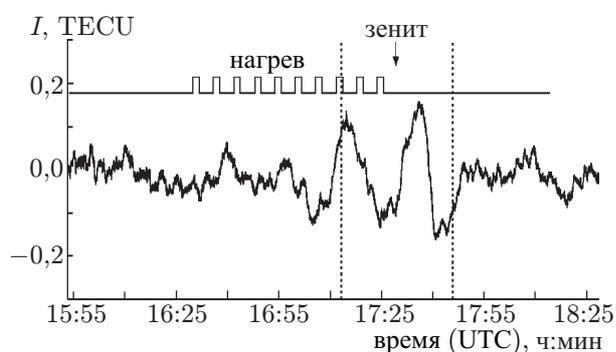


Рис. 3. Вариации ПЭС после удаления тренда для сеанса, представленного на рис. 1. Стрелка с надписью «зенит» указывает момент, когда спутник находился вертикально над стендом «Сура»

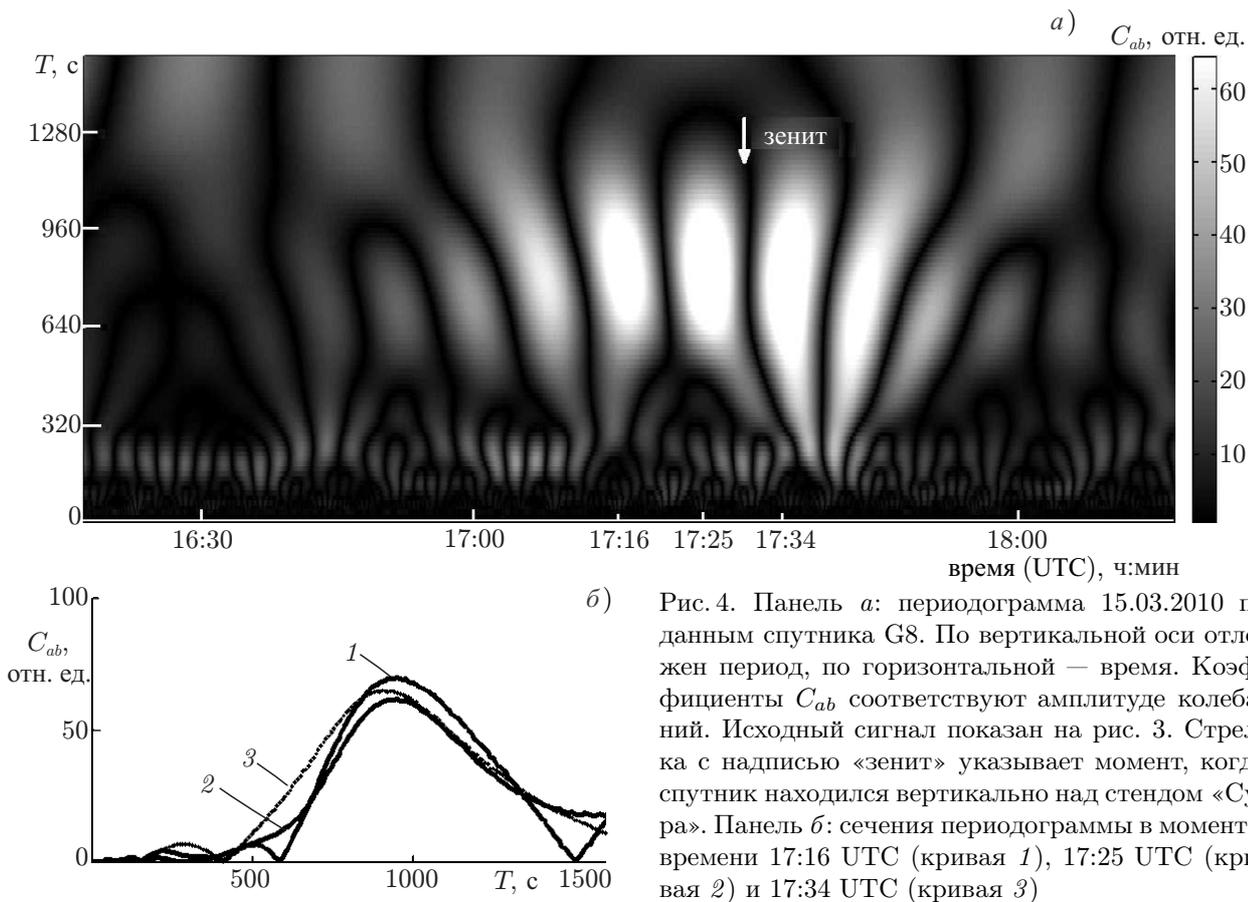


Рис. 4. Панель а: периодограмма 15.03.2010 по данным спутника G8. По вертикальной оси отложен период, по горизонтальной — время. Коэффициенты C_{ab} соответствуют амплитуде колебаний. Исходный сигнал показан на рис. 3. Стрелка с надписью «зенит» указывает момент, когда спутник находился вертикально над стендом «Сура». Панель б: сечения периодограммы в моменты времени 17:16 UTC (кривая 1), 17:25 UTC (кривая 2) и 17:34 UTC (кривая 3)

Периодограмма наглядно демонстрирует наличие «длиннопериодных» вариаций ПЭС с характерными периодами $T \approx 700 \div 1200$ с (с максимумом при $T \approx 900$ с = 15 мин) во время пролёта спутника над стендом «Сура», причём максимальные вариации имеют место при пересечении диаграммы направленности передающей антенны (пересечение зенита в 17:30 UTC, в это время согласно рис. 3 наблюдается достаточно глубокий минимум ПЭС). Для оценки пространственного масштаба неоднородностей воспользуемся выражением

$$D = V \frac{H_F}{H_{GPS}} T, \tag{8}$$

где D — поперечный масштаб, H_F — высота отражения волны, $H_{GPS} = 20\,180$ км — высота орбиты спутника, $V = 3,8$ км/с — линейная скорость движения спутника, T — период наблюдаемых

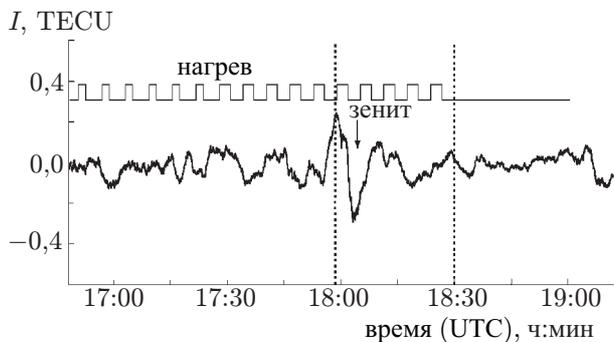


Рис. 5. Вариации ПЭС относительно среднего уровня 15.03.2010 по данным спутника G28. Пунктиром ограничен интервал пролёта спутника через диаграмму направленности передающей антенны стенда «Сура» (режимы излучения [+2 мин, -4 мин] и [+3 мин, -3 мин], $f_0 = 4,3$ МГц, $P_0 = 120$ МВт), стрелкой указано время прохождения спутником магнитного зенита

осцилляций. По данным ионосферной станции «Базис» во время проведения эксперимента $H_F = 260$ км, таким образом, $D = 29 \div 62$ км (максимум для $D = 44$ км).

Нагрев ионосферы 17.03.2010 осуществлялся на частоте $f_0 = 4,3$ МГц с эффективной мощностью $P_0 = 120$ МВт в режимах [+2 мин, -4 мин] и [+3 мин, -3 мин] во время пролёта спутника G28 над стендом «Сура» (рис. 5). Диаграмма передающей антенны была наклонена на 12° к югу. В это время наблюдались значительные вариации ПЭС, достигающие 0,25 TECU (примерно 1,4 % от абсолютного значения), что на 60 % больше, чем в эксперименте при вертикальном нагреве, представленном на рис. 3.

Наибольшая амплитуда колебаний приходится на интервал времени 18:05–18:10 UTC, когда спутник был наиболее близок к магнитному зениту, который в точке регистрации сигналов (на стенде «Сура») находится на $18,5^\circ$ южнее зенита (рис. 6). Траектория движения спутника G28 17.03.2010 приведена на рис. 6, периодограмма вариаций ПЭС — на рис. 7. Характерные периоды осцилляций ПЭС согласно периодограмме, приведённой на рис. 7, составляют $T \approx 350 \div 800$ с, максимум при $T \approx 500$ с. Согласно (8), поперечный масштаб неоднородностей электронной кон-

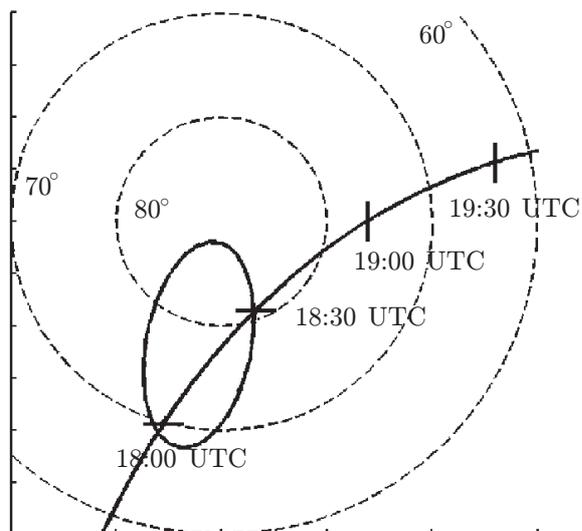


Рис. 6. Траектория спутника G28 17.03.2010 (обозначения аналогичны рис. 1). Диаграмма направленности стенда «Сура» (эллипс на диаграмме) наклонена на 12° к югу

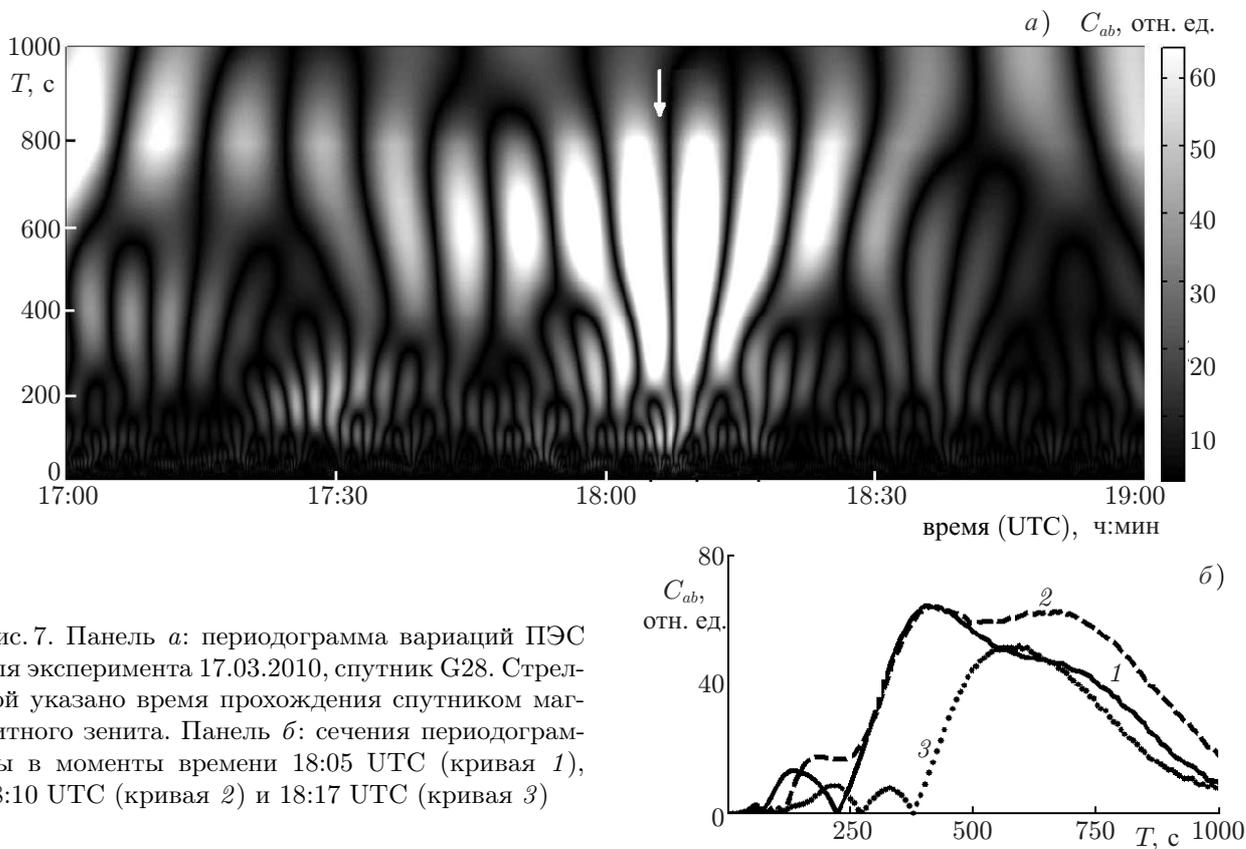


Рис. 7. Панель *a*: периодограмма вариаций ПЭС для эксперимента 17.03.2010, спутник G28. Стрелкой указано время прохождения спутником магнитного зенита. Панель *b*: сечения периодограммы в моменты времени 18:05 UTC (кривая 1), 18:10 UTC (кривая 2) и 18:17 UTC (кривая 3)

центрации на высоте 280 км составляет $D = 17 \div 40$ км (максимум для $D = 25$ км).

Всего вариации ПЭС были зафиксированы в пяти экспериментах из шести проведённых в вечерние и ночные часы с наклоном диаграммы направленности к югу на 12° , при вертикальном воздействии — в 7 из 14 экспериментов. Кроме того, при наклонном воздействии амплитуда вариаций ПЭС в среднем оказалась на 20 % больше по сравнению с работой в зенит. Таким образом, можно сделать вывод о том, что наклон центрального луча диаграммы к югу по направлению к магнитному зениту приводит к более уверенному возбуждению и увеличению амплитуды вариаций ПЭС.

В экспериментах 26–28 августа 2009 года было задействовано два передатчика стенда «Сура» из трёх, эффективная излучаемая мощность составляла 65 МВт. Из пяти проведённых сеансов (16:00–22:00 LT) вариации ПЭС были отмечены только в одном случае. Для сравнения, в аналогичное время суток при работе на полной мощности 120 МВт вариации наблюдаются в 80 % случаев. Нагрев ионосферы осуществлялся в комбинированном режиме: непрерывно и в режиме $[+2 \text{ мин}, -4 \text{ мин}]$, $f_0 = 4,3$ МГц, диаграмма антенны была направлена вертикально в зенит. На рис. 8 приведена зависимость вариаций ПЭС от времени по данным со спутника G21 27.08.2009, на рис. 9 приведена траектория движения спутника, на рис. 10 — периодограмма вариаций ПЭС. Из рис. 8 видно, что, несмотря на относительно низкую мощность излучения, амплитуды вариаций достигают значений порядка $0,2 \div 0,3$ TECU, что говорит о том, что искусственные неоднородности могут образовываться и при мощностях излучения порядка 60 МВт.

Следует отметить, что при работе двух передатчиков стенда диаграмма направленности оказывается вытянутой вдоль линии север—юг, и её полуширина составляет порядка 12° . Кроме того, спутник пересекал диаграмму направленности несколько южнее стенда, а максимальные вариации ПЭС наблюдались во время пересечения спутником (точнее — проекцией луча спутник—приёмник на высоту области взаимодействия мощной волны с ионосферной плазмой) магнитного меридиана стенда, в 18:05 UTC.

Как видно из периодограммы (рис. 10), амплитуда возмущений в среднем за сеанс меньше, чем при нагреве на полной мощности. Характерные периоды осцилляций ПЭС в данном случае

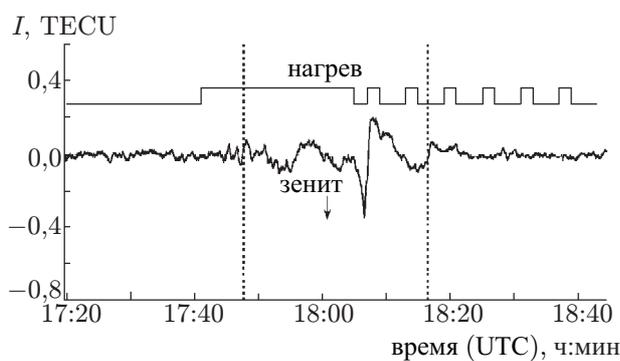


Рис. 8. Вариации ПЭС относительно среднего уровня 27.08.2009 по данным со спутника G21. Пунктиром ограничен интервал пролёта спутника через диаграмму передающей антенны стенда «Сура» (режимы излучения непрерывно и $[+2 \text{ мин}, -4 \text{ мин}]$, $f_0 = 4,3$ МГц, $P_0 = 65$ МВт); стрелкой указано время прохождения спутником магнитного меридиана стенда

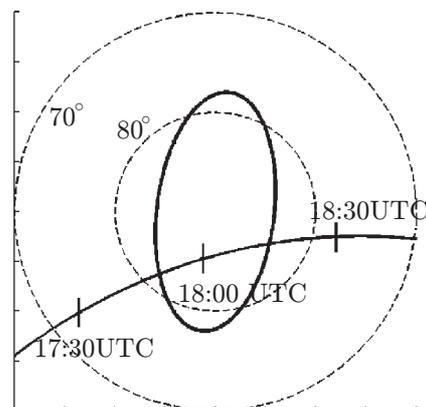


Рис. 9. Траектория спутника G21 27.08.2009 (обозначения аналогичны рис. 1 и 6)

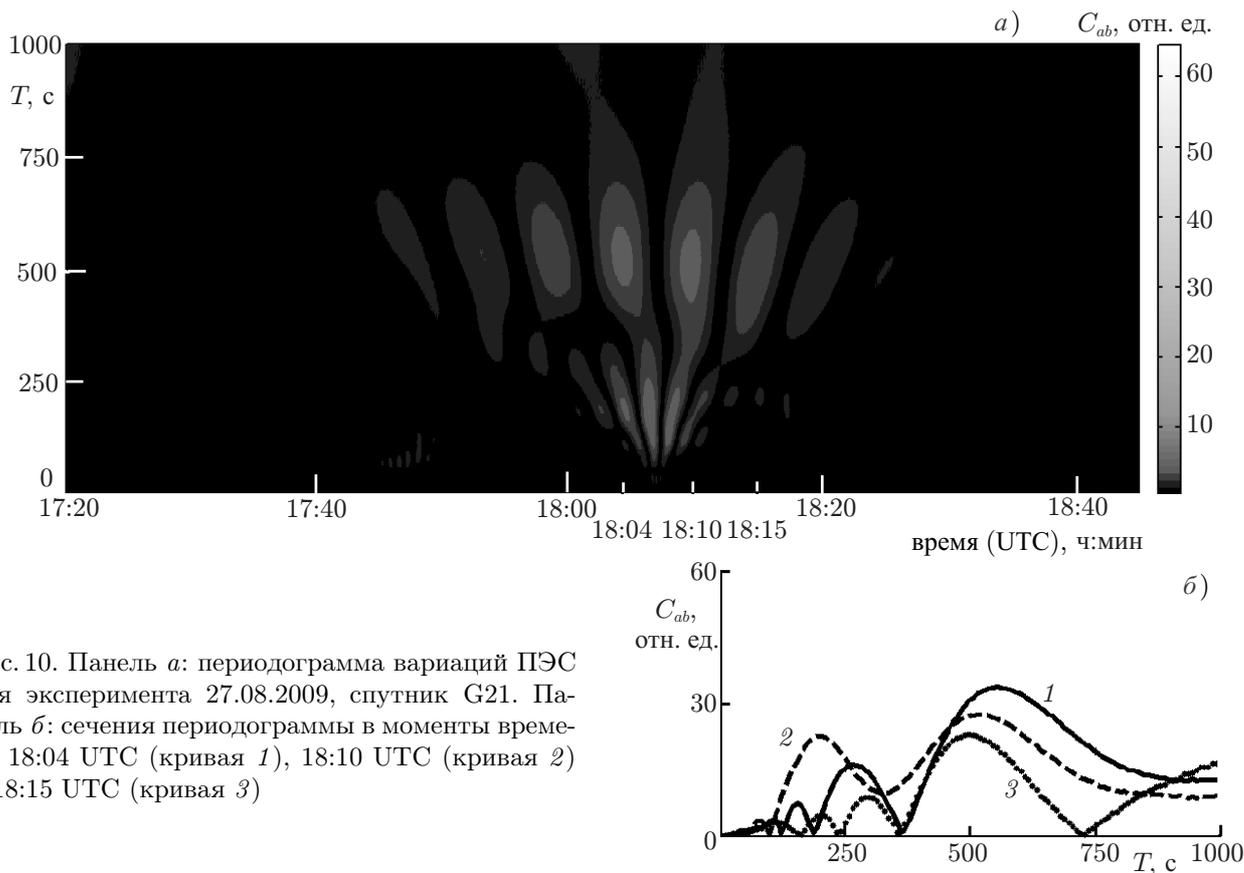


Рис. 10. Панель *a*: периодограмма вариаций ПЭС для эксперимента 27.08.2009, спутник G21. Панель *б*: сечения периодограммы в моменты времени 18:04 UTC (кривая 1), 18:10 UTC (кривая 2) и 18:15 UTC (кривая 3)

составляют $T \approx 400 \div 600$ с (максимум при $T = 550$ с) и $T \approx 100 \div 200$ с. Колебания с малыми периодами были отмечены только в данном сеансе измерений ПЭС, причина их происхождения не известна, однако вероятно, что эти вариации не связаны с крупномасштабными неоднородностями электронной концентрации. Согласно выражению (8), поперечный масштаб искусственных крупномасштабных неоднородностей для данного случая $D = 20 \div 30$ км (максимум для $D \approx 27$ км).

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В предыдущем разделе статьи приведены типичные реализации ПЭС, отражающие характерные особенности вариаций ПЭС при нагреве ионосферы для всех проведённых измерений. Показанная на рис. 1, 3 и 5 зависимость ПЭС от времени типична для вечерних и ночных сеансов (17:00–01:00 LT) воздействия на ионосферу излучением обыкновенной поляризации. Амплитуда колебаний как правило составляет $0,1 \div 0,25$ TECU и зависит от мощности излучения и геофизических условий.

Из-за небольшой скорости сканирования спутниковым сигналом исследуемой области данная диагностика носит пространственно-временной характер. С одной стороны, каждое новое измерение ПЭС выполняется для новой траектории, соединяющей спутник GPS и приёмник, с другой — продолжительность пролёта над возмущённой областью составляет приблизительно 30 мин. Поэтому характер наблюдаемых вариаций может быть обусловлен как пространственными особенностями возмущённой ионосферы, так и изменением концентрации электронов во времени. Однако, учитывая инертность ионосферы и пренебрегая ветровыми движениями в ней,

можно сделать вывод, что данные вариации обусловлены в первую очередь пространственными неоднородностями электронного содержания. В большинстве сеансов регистрации нагрев ионосферы начинался за 20÷30 мин до влёта спутника в диаграмму передающей антенны, поэтому можно утверждать, что во время пролёта спутника через диаграмму передающей антенны все возмущения электронной концентрации находились в стационарном состоянии. Кроме того, об отсутствии заметных передвижений неоднородностей электронной концентрации вдоль траектории сканирования спутником возмущённой области ионосферы можно судить по положению пятна искусственного оптического свечения ионосферы [7], вызванного искусственным воздействием. Регистрация портретов ночного неба (искусственного оптического свечения ионосферы) в красной линии атомарного кислорода (длина волны 630 нм) проводилась во время измерений 15.03.2010 и 17.03.2010, при этом заметных перемещений пятна свечения по небосводу вдоль траектории сканирования в течение достаточно длительного времени отмечено не было. Этот факт проиллюстрирован на рис. 2б, где показаны контуры пятна свечения по уровню 50 % от максимальной интенсивности в конце трёх сеансов воздействия. Видно, что перемещения пятна вдоль линии восток—запад практически отсутствуют. Перемещения пятна вдоль линии север—юг связаны, скорее всего, с высотными изменениями профиля электронной концентрации [9]. Из этих наблюдений следует, в частности, что перемещения плазмы, связанные с ветровыми движениями, во время этих экспериментов не отмечались. Наличие регулярных ветровых движений должно приводить, как указано в [7] и [9, 10], к перемещению пятна свечения в восточном направлении.

В ходе экспериментов установлено, что в области отражения мощной радиоволны образуются крупномасштабные неоднородности концентрации плазмы с размерами, близкими к размерам диаграммы направленности. Периоды вариаций ПЭС, определённые с помощью вейвлет-анализа, составляли в наших экспериментах от 400 до 1 200 с, что в отсутствие ветровых движений соответствует масштабам неоднородностей поперёк луча зрения 20÷60 км. Следует отметить, что диаметр диаграммы направленности по уровню половинной мощности, на частоте 4,3 МГц на высоте 280 км составляет 60 км. Амплитуды вариаций ПЭС составляли 0,1÷0,3 TECU.

По данным эксперимента 15 марта 2010 года время релаксации таких неоднородностей после выключения волны накачки оказывается достаточно большим ($t \geq 15$ мин). В то же время вариаций ПЭС с периодом воздействия (6 мин в наших экспериментах) обнаружено не было. По всей видимости, это связано с недостаточной мощностью воздействия. Вариации ПЭС с периодом воздействия порядка 20 с отмечались на стенде HAARP при существенно большей мощности воздействия [5]. В работах [2, 5] отмечалось коррелированное с воздействием увеличение ПЭС при пролёте спутников через диаграмму направленности. В наших экспериментах такое увеличение наблюдалось однажды, 15.03.2010. Специальный анализ данных, проведённых с временем текущего усреднения 40 и 50 мин, показал, что видимое на рис. 1 увеличение ПЭС достигает 0,15÷0,20 TECU, в отсутствие ветровых движений диаметр области повышенного ПЭС составляет примерно 100 км. В отличие от [2, 5] увеличенные значения ПЭС наблюдались стационарно в течение всего времени пролёта спутника через диаграмму направленности стенда, тогда как увеличения ПЭС в экспериментах [2, 5] отмечались в такт с включением и выключением волны накачки (периоды 20 с в [5], 1 мин и 10 мин в [2]). Среднего уменьшения ПЭС в возмущённой области ионосферы, отмеченного в [6], в наших экспериментах не наблюдалось.

Используя полученные данные по амплитуде вариаций ПЭС, можно оценить амплитуду вариаций концентрации плазмы в области взаимодействия с мощной радиоволной вблизи максимума F -слоя, задавшись некоторой моделью высотной зависимости электронной концентрации. На рис. 11 приведено распределение электронной концентрации по высоте согласно модели IRI [11] в невозмущённой ионосфере с учётом нормировки профиля электронной концентрации по значению ПЭС и корректировки профиля в нижней ионосфере по данным ионосферной

станции «Базис».

Зададим следующую высотную зависимость возмущений электронной концентрации $\Delta N_e \propto \exp(-|z - Z_0|/H)$, где Z_0 — высота области взаимодействия, H — продольный размер неоднородностей электронной концентрации, определяемый продольной (вдоль магнитного поля) длиной теплопроводности. В условиях эксперимента $H \approx 30 \div 50$ км [11]. Известно, что колебания электронной концентрации составляют $10 \div 20$ % от значения N_e , тогда для вариаций электронной концентрации запишем следующее выражение: $\Delta N_e = (0,1 \div 0,2) N_e \exp(-|z - Z_0|/H)$. Амплитуда вариаций полного электронного содержания dI связана с электронной концентрацией соотношением

$$dI = \int_{Z_0-H}^{Z_0+H} \Delta N_e dz. \quad (9)$$

По результатам наблюдений $dI \approx 0,15 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-2}$, тогда в предположении, что $\Delta N_e = 0,1 N_e$, получим $H \approx 100$ км, если положить $\Delta N_e = 0,2 N_e$, то $H \approx 35$ км, что примерно соответствует длине теплопроводности на высотах отражения $250 \div 350$ км. Такая величина ΔN_e примерно соответствует существующим теоретическим представлениям [1, 13, 14].

По данным экспериментов при наклоне диаграммы направленности к югу на 12° амплитуда вариаций крупномасштабных неоднородностей оказалась несколько большей (примерно на 20 %), чем при излучении вертикально вверх. Кроме того, при таком нагреве оказалась большей вероятность обнаружения вариаций ПЭС. Такой эффект, по всей видимости, связан с эффектом магнитного зенита, т. е. усилением взаимодействия мощной волны с ионосферной плазмой при распространении волны накачки вдоль магнитного поля [6, 15, 16]. Следует отметить, что данный эффект исследовался с помощью просвечивания сигналами GPS в работе [5]. Отметим, что при наклоне центрального луча диаграммы направленности на 12° к югу максимальная интенсивность искусственных неоднородностей имеет место, по всей видимости, в направлении именно магнитного зенита, т. е. вдоль луча зрения, наклонённого на $18,5^\circ$. Аналогичный эффект (увеличение яркости) наблюдался по данным измерений оптического свечения в линии 630 нм [10].

Работа поддержана грантом РФФИ 09-02-01150 и аналитической целевой ведомственной программой «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.1.1/1167).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич А. В. // УФН. 2007. Т. 77, № 11. С. 1145.
2. Фролов В. Л., Комраков Г. П., Куницын В. Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 7. С. 421.
3. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НИЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
4. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1960.
5. Milikh G., Gurevich A., Zybin K., Secan J. // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. Art. no. L22102.

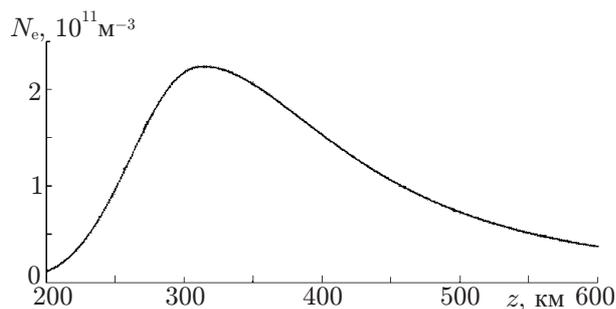


Рис. 11. Распределение электронной концентрации по высоте, модель IRI, 17 марта 2010 года

6. Терещенко Е. Д., Миличенко А. Н., Фролов В. Л., Юрик Р. Ю. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 11. С. 934.
7. Pedersen T. R., McCarric M., Gerken E., et al. // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. P. 1169.
8. Grach S. M., Kosch M. J., Yashnov V. A., et al. // Ann. Geophys. 2007. V. 25. P. 689.
9. Bernhardt P. A., Tepley C. A., Duncan L. M. // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. P. 9071.
10. Bernhardt P. A., Wong M., Huba J. D., et al. // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. P. 10657.
11. http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri_vitmo.html.
12. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 1973.
13. Игнатъев Ю. А., Кротова З. Н., Митякова Э. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1977. Т. 20, № 12. С. 1846.
14. Бахметьева Н. В., Игнатъев Ю. А., Петрухина В. И., Савельев С. М. // Геомагнетизм и аэрономия. 1982. Т. 22, № 6. С. 924.
15. Rietveld M. T., Kosch M. J., Blagoveshchenskaya N. F., et al. // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. P. 1141.
16. Гуревич А. В., Зыбин К. Р., Карлсон Х. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48. С. 772.

Поступила в редакцию 10 декабря 2010 г.; принята в печать 6 октября 2011 г.

STUDYING CHARACTERISTICS OF THE LARGE-SCALE IONOSPHERIC IRREGULARITIES INDUCED BY HIGH-POWER HF RADIO EMISSION WITH GPS DIAGNOSIS

A. V. Ryabov, S. M. Grach, A. V. Shindin, and D. S. Kotik

We present the results of experimental studies of artificial large-scale irregularities of the ionospheric electron number density with dual-frequency GPS diagnosis. The total electron content was analyzed in the GPS signal trajectory when the satellites passed over the heated region. Spectral composition of the observed variations was determined by wavelet analysis. Characteristic scales of artificial irregularities of the electron number density in the *F* layer are estimated. It is experimentally proved that the irregularities remain for at least 15–20 min after the transmitter is switched off. A more confident excitation and increased intensity of the irregularities were also confirmed when the beam was inclined south of the magnetic-zenith direction.